

DOI: 10.11779/CJGE2024S10017

水下防护设施插桩响应的离心模型试验研究

李书兆¹, 曹添铭^{*2}, 沈晓鹏¹, 陈邦敏¹, 李伟¹, 刘润², 江宇², 郝心童²

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 某拟建水下油气生产系统采用大直径薄壁钢圆筒作为防护设施。自升式钻井船进行钻修井作业时, 桩靴插拔会产生较大范围的挤土作用, 当钻井船插拔桩位置靠近水下生产系统的防护设施时, 会导致钢圆筒产生附加的应力和变形, 从而对水下生产系统产生影响。为此开展离心模型试验, 研究黏土中不同桩靴插桩深度, 不同间距对水下生产系统防护设施钢圆筒的影响。研究表明, 钢圆筒的筒壁应变、筒顶变形及筒壁土压力均随筒靴间距的增加而减小, 随桩靴贯入深度的增加而增加, 与桩靴下压阻力同步发展。插桩引起的筒身应变主要集中在正对桩靴一侧, 当筒靴间距小于 0.9 倍桩靴直径时, 钢圆筒筒壁发生屈服; 筒顶位移主要为向筒内发展的水平向位移; 筒壁土压力增量约为静止土压力的 0.6 倍。桩靴插桩对钢圆筒的影响范围超过了 1.3 倍的桩靴直径。

关键词: 水下生产系统; 钢圆筒; 桩靴插桩; 离心模型试验; 应力; 位移

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0152-06

作者简介: 李书兆(1985—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从海洋石油相关领域的研究。E-mail: lishzh17@cnooc.com.cn。

Centrifugal model tests on effects of spudcan penetration on adjacent steel cylinder in clay

LI Shuzhao¹, CAO Tianming², SHEN Xiaopeng¹, CHEN Bangmin¹, LI Wei¹, LIU Run², JIANG Yu², HAO Xintong²

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent

Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An underwater oil and gas production system is proposed to adopt large-diameter thin-walled steel cylinder as a protective facility. When the jackup drilling ship is operating, the insertion and removal of spudcans will cause a wide range of soil squeezing. When the insertion and removal position of spudcans is close to the underwater protection facilities, the stability of the underwater protection facilities and their foundation will be seriously affected. For this reason, the centrifuge model tests are carried out to study the influences of different depths and spacings of a spudcan in clay on the steel cylinder of the protective facilities. The results show that the wall strain, top deformation and wall earth pressure of steel cylinder decrease with the increase of the cylinder-spudcan distance, and increase with the increase of the spudcan depth, and develop synchronously with the pressure resistance of the spudcan. When the cylinder-spudcan distance is less than 0.9 times the diameter of the spudcan, the wall of the steel cylinder will yield. The top deformation of the cylinder is mainly the horizontal displacement developed into the cylinder. The increment of the earth pressure on the cylinder wall is 0.6 times that of static earth pressure. The influence range of the spudcan on the steel cylinder exceeds 1.3 times the diameter of the spudcan.

Key words: underwater production system; steel cylinder; spudcan penetration; centrifugal model test; stress; deformation

0 引言

中国海洋油气资源储量丰富, 某海域采用水下生产系统进行油气资源开发时, 采用了海床泥面下大直径薄壁钢圆筒作为水下生产系统的防护结构。为了满足生产工艺的要求, 钢圆筒内部挖空, 形成底部嵌入土体的圆形中空筒型结构^[1]。

在油气资源开发过程中, 常采用自升式钻井船进行钻修井作业。自升式钻井船靠近水下防护结构作业的过程中, 桩靴插拔会产生较大范围的挤土作用, 不

可避免的对钢圆筒受力和变形产生影响, 进而影响整个水下生产系统的安全运行。

目前针对海洋工程中大型钢圆筒与土相互作用的问题, 有学者针对钢圆筒振沉和的稳定性问题开展了研究^[2], 日本 OCDI 的设计规程^[3]和中国的《插入式钢圆筒结构设计与施工规范》^[4], 对此都有明确的规定。

基金项目: 渤海油气田水下生产系统国产化研究与示范项目 (CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 07 ZY); 国家杰出青年科学基金项目 (51825904)

收稿日期: 2024-04-29

***通信作者** (E-mail: zncyx123456@126.com)

但对于钢圆筒附近钻井船插桩的特殊情况尚未有学者进行相关的研究。

土工离心试验可通过对模型施加与原型重力等效的离心力来模拟原型土体的应力水平, 是用来研究桩靴插桩问题的有效手段之一。Siciliano 等^[5], Craig^[6], Xie^[7], Zhang 等^[8]开展了系列离心模型试验和室内模型试验, 研究了桩靴插拔对邻近桩基偏位或变形的影响, 桩靴插拔对筒型结构物的影响研究很少。

针对水下生产系统钢圆筒防护结构的大直径、薄壁、中空等特点, 开展桩靴插桩对邻近钢圆筒影响的离心模型试验, 重点关注桩靴插入土体的过程中, 钢圆筒筒壁应力、筒顶位移及筒壁土压力的变化规律, 从而明确插桩对钢圆筒产生不利影响的间距。

1 试验方案

1.1 试验模型

以实际工程为原型, 开展试验研究。模型试验在 TK-C500 土工离心机上完成。试验比尺为 1:100, 以消除模型边界效应, 选用试验模型箱尺寸为 1200 mm×1000 mm×1200 mm, 模型布置如图 1 (a), (b) 所示。

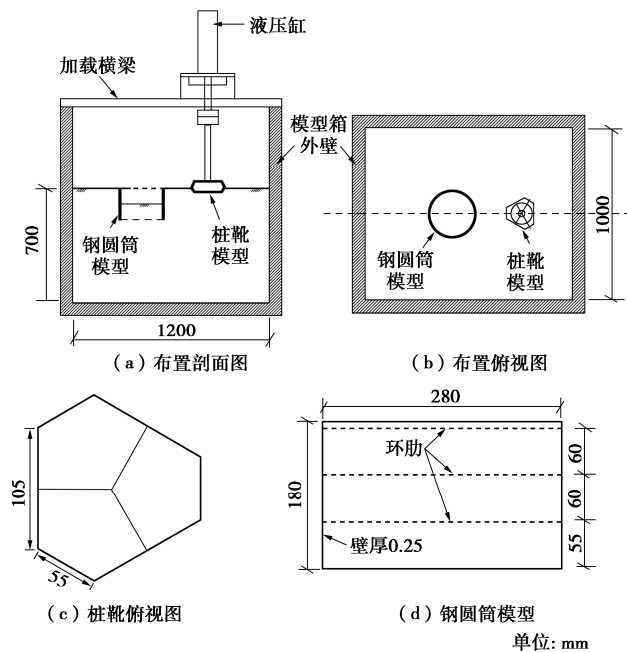


图 1 试验模型尺寸

Fig. 1 Sizes of test model

根据拟使用钻井船参数, 确定桩靴为六边形, 具体尺寸如图 1 (c) 所示, 等效桩靴直径 $D=160$ mm。桩靴加载杆上设有拉压力传感器和位移传感器。模型钢圆筒外径为 280 mm, 筒高 180 mm, 壁厚 0.25 mm, 内部设有 3 道环型加强肋, 环肋宽度 2.5 mm, 厚度为 0.25 mm, 如图 1 (d) 所示。钢圆筒埋入土中, 筒顶

部与外侧土面平齐, 筒内 92 mm 深度挖空。钢圆筒采用 304 不锈钢制作, 材料的弹性模量 $E=200$ GPa 与原型 Q345 钢材的弹性模量相近。

在钢圆筒筒壁外侧共布置 8 竖列, 每列 5 个横向布置的应变片, 以测量筒壁沿环向的应变变化, 各应变片间距 40 mm, 如图 2 (a) 所示, 其中 A1 号应变片为正对桩靴方向。在筒顶的 4 个位置分别设置竖向和水平向的位移传测点, 采用激光位移传感器进行测量。如图 2 (b) 所示, 其中 H1, V1 测点分别为靠近桩靴的水平 and 竖直位移测点。在筒壁外侧正对桩靴方向和左侧 45° 方向设置两列土压力盒, 土压力盒布置如图 2 (c) 所示。

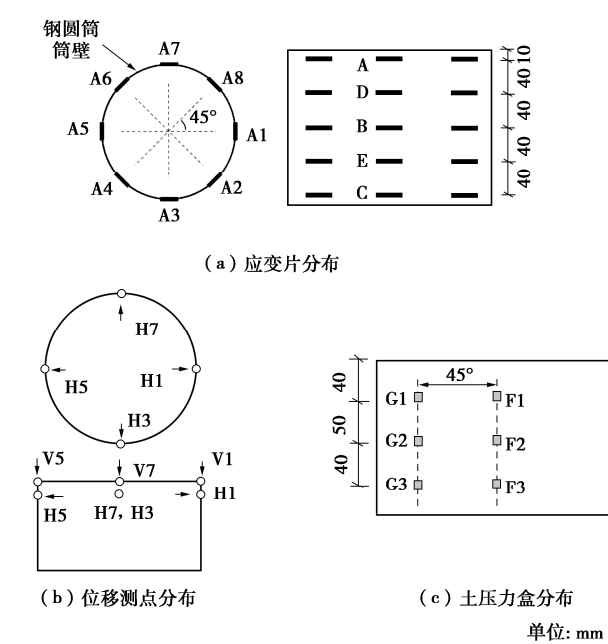


图 2 传感器测点分布

Fig. 2 Distribution of sensors and measuring points

试验所用黏土为高岭土, 其参数如表 1 所示。调配含水率为 2 倍液限的泥浆, 经负压搅拌后置入模型箱中, 经过压载固结和离心固结, 最终制备黏土不排水抗剪强度为 30 kPa。

表 1 黏土参数

Table 1 Parameters of clay

参数	数值
土粒相对质量密度 G_s	2.65
液限 $w_L/\%$	48.4
塑限 $w_p/\%$	27.3
饱和重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	19.5
含水率 $w/\%$	14.0

1.2 试验方案

为分析不同的钢圆筒和桩靴间距对试验结果的影响, 试验方案如表 2 所示。试验过程中, 首先将模型安装到位, 在 100g 离心加速度条件下进行固结, 待变形稳定后再进行桩靴加载; 桩靴下压到试验深度后,

桩靴维持静止状态 300 s, 再进行上拔; 桩靴上拔至土面后试验结束。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

次序	筒靴间距 L/mm	桩靴贯入深度 H/mm	加载速率 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
C1	90	50	0.5
C2	144	50	0.5
C3	180	50	0.5

2 桩靴插深对钢圆筒的影响

共开展 3 组离心模型试验, 所得结果以 C2 组筒靴间距 14.4 m 的试验为例进行说明, C1, C3 组试验具有相近的规律性。结果中所述数值, 已通过比尺换算为原型数据。

2.1 桩靴的下压过程

筒靴间距 14.4 m 试验中得到桩靴下压-上拔过程中, 下压阻力-桩靴深度曲线, 如图 3 所示。

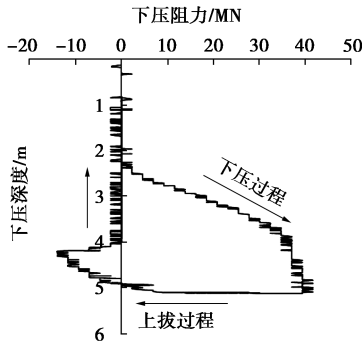


图 3 桩靴下压阻力-深度曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of spudcan penetration

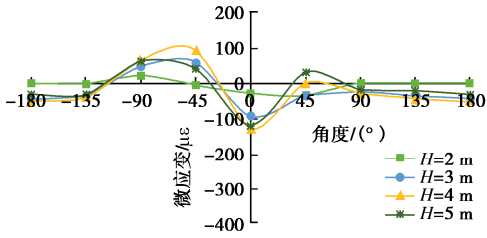
由图 3 可知, 下压过程中, 桩靴刚入土时, 锥尖部分入土, 受到的阻力较小, 当桩靴贯入深度为 2.16 m 时, 桩靴最大截面开始入土, 下压阻力随下压深度开始增加, 桩靴贯入深度至 5 m 时最大下压阻力为 41.6 MN。上拔过程中, 阻力迅速减小并转为黏土对桩靴的吸附力, 上拔至 4.22 m 时最大吸附力为 -13.9 MN, 约为最大下压阻力的 33.4%。

2.2 筒身应变的变化规律

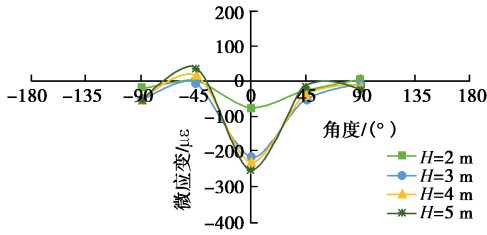
桩靴贯入不同深度时, 筒身各位置的应变沿筒壁的分布情况, 如图 4 所示。其中应变单位为微应变($\mu\epsilon$)以受拉为正, 横轴为应变片所在的筒壁环向位置的角度, 其中以 A1 应变片所在列为 0° , 角度沿筒壁以逆时针递增。

由图 4 可知, 筒壁各位置处应变均随桩靴贯入深度的增加而增大。桩靴初始下压阶段, 筒身应变增长不明显, 当桩靴贯入深度达到约 2 m 时, 筒身应变显著增长。桩靴深度至 5 m 后, 各点应变达到最大值。筒身各点应变以 A1 列为中线, 接近左右对称分布。

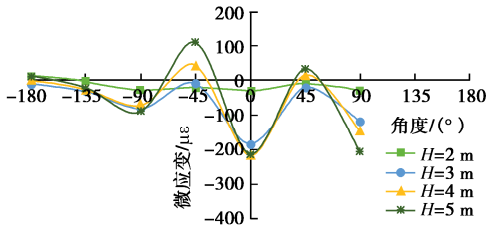
产生应变的区域主要集中在 $\pm 90^\circ$ 范围内。



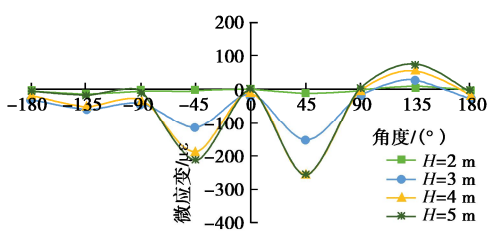
(a) $Z=1\text{ m}$



(b) $Z=5\text{ m}$



(c) $Z=9\text{ m}$



(d) $Z=17\text{ m}$

图 4 筒壁应变分布

Fig. 4 Strain distribution on steel cylindrical wall

2.3 筒顶位移的变化规律

筒顶各测点位移结果如图 5 所示。其中水平向位移以指向筒内为正, 竖向位移以向上为正。

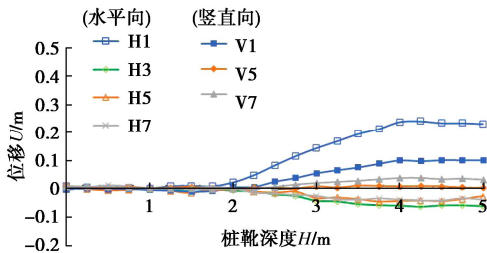


图 5 位移-深度曲线 (试验 C2, 间距 14.4 m)

Fig. 5 Displacement-depth curves (Test C2, $L=14.4\text{ m}$)

由图 5 可知, 筒顶各点竖直和水平向位移均随桩靴贯入深度的增加而增长, 桩靴初始下压阶段, 筒顶位移变化较小, 桩靴贯入深度约 2 m 时筒顶位移显著增长, 最大位移为 H1 测点, 说明筒壁的变形主要为向钢圆筒内的水平变形。

2.4 筒壁土压力的变化规律

插桩过程筒壁土压力-深度曲线如图 6 所示。

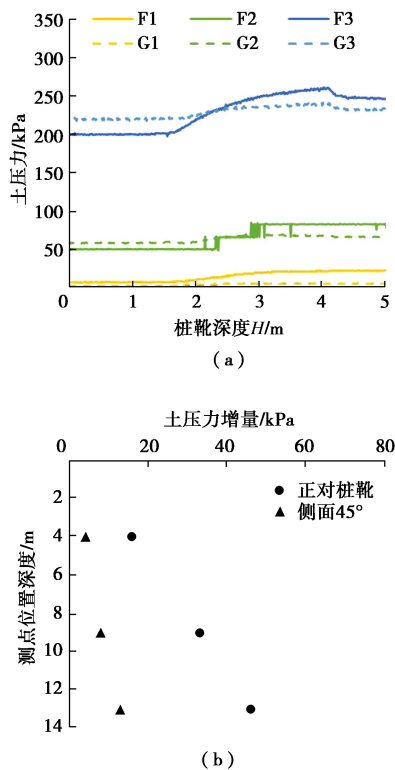


图 6 土压力-深度关系

Fig 6 Earth pressure-depth curves

由图 6 可知, 筒壁外侧土压力随桩靴贯入深度的增加而增大。当桩靴贯入深度达到约 2 m 时, 筒壁土压力开始明显增加。同一列较深位置的土压力数值较大。桩靴贯入深度 5 m 时, 土压力增量随测点位置深度的增加而增大, 正对桩靴位置的土压力增量均大于侧面 45° 位置的土压力增量。

2.5 归一化结果

将桩靴下压阻力、应变 (A1)、位移 (H1)、土压力增量 (F3) 进行归一化处理。以桩靴下压过程中对应的最大数值为 1, 得到各数据随桩靴贯入深度的关系如图 7 所示。由图 7 结果可知, 筒壁应变、筒顶位移和筒壁土压力增量结果随桩靴贯入深度的变化规律具有一致性: 初始阶段筒身各测点数据基本不变, 当桩靴贯入深度达到 2 m 后, 筒身各测试数据开始明显变化。这一延迟变化的现象与桩靴下压阻力的发展规律是一致。可以认为桩靴贯入深度小于 2 m 时, 桩靴

下压阻力较小且对钢圆筒影响较小。桩靴贯入深度超过 2 m 后, 桩靴下压阻力、筒壁应变、筒顶位移和筒壁土压力增量随桩靴贯入深度同步增大。但筒壁应变、筒顶位移和土压力增量结果在桩靴贯入深度 4 m 时达到峰值, 而后略有减小, 这是因为此时桩靴已完全贯入土中, 桩靴以上形成了较大孔穴, 孔穴的存在使桩靴横向挤土效果减弱, 但对桩靴竖向的下压阻力影响较小^[9]。

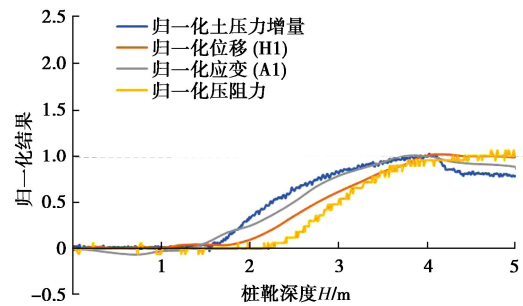


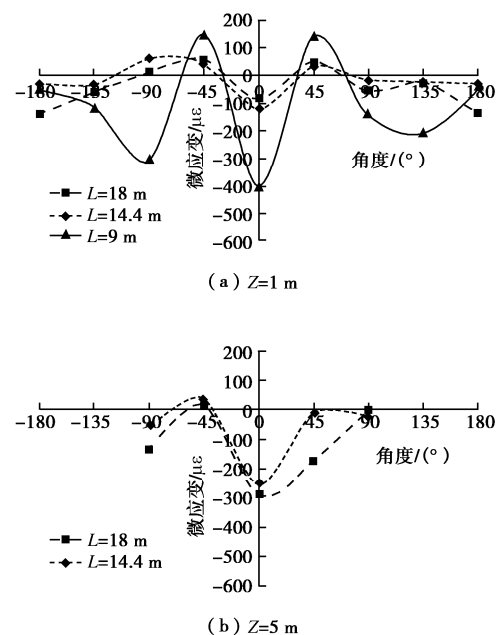
图 7 归一化试验结果-深度曲线

Fig. 7 Normalized result-depth curves

3 筒-靴间距对钢圆筒的影响

3.1 筒身应变的变化规律

在桩靴贯入深度 5 m 时, 不同筒靴间距情况下, 筒壁各测点的应变分布情况如图 8 所示。由图 8 可知, 当 Z 为 1, 5, 9 m 时, 不同筒靴间距下筒壁的应变分布情况与图 4 中所述规律相近。筒壁上相同位置, 筒靴间距 9 m 时的应变数值最大, 筒靴间距为 14.4, 18 m 时应变较小且数值相近, 可知在桩靴插桩过程中, 应变的数值随筒靴间距增大而减小。



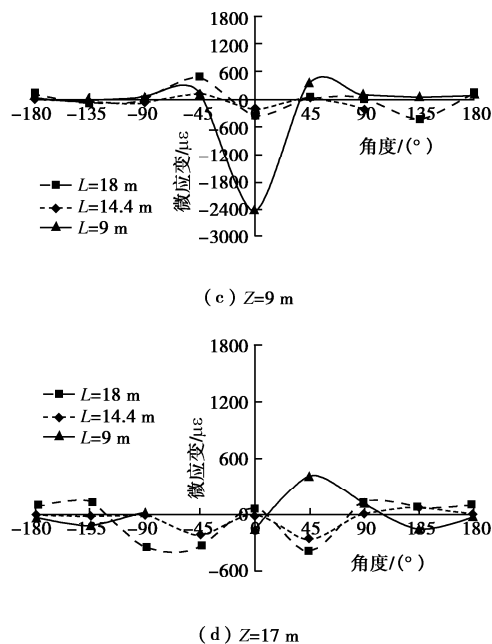
图 8 不同间距 L 应变对比

Fig. 8 Comparison of strains under different spacings

此外还注意到, 筒靴间距 9 m 时筒壁应变超过 $1000 \mu\epsilon$, 对应的筒壁应力超过 200 MPa 屈服强度 (此处为模型材料不锈钢的屈服强度, 原型的屈服强度为 345 MPa)。桩靴插桩造成了筒壁发生屈服。筒靴间距为 14.4, 18 m 时筒壁最大应变均小于 $1000 \mu\epsilon$, 筒壁未屈服。

3.2 筒顶位移的变化规律

在桩靴贯入深度 5 m 时, 筒顶位移与筒靴间距的关系, 如图 9 所示。由图 9 可知, 筒顶各点位移均随筒靴间距的增大而减小。最大位移均发生在 H1 点的水平方向, 其中筒靴间距 9 m 时最大位移为 0.6 m, 筒靴间距 14.4 m 时最大位移为 0.33 m, 筒靴间距 18 m 时最大位移为 0.18 m。

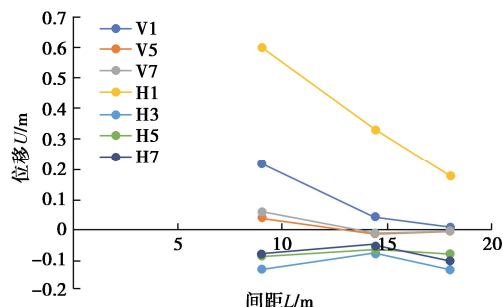


图 9 不同筒靴间距时筒顶位移变化

Fig. 9 Comparisons of displacement under different spacing L

3.3 筒壁土压力的变化规律

桩靴贯入深度 5 m 时, 不同筒靴间距下 F3 点土压力的增量值, 结果如图 10 所示。由图 10 可以知, 同一位置的土压力增量随筒靴间距增大而减小。

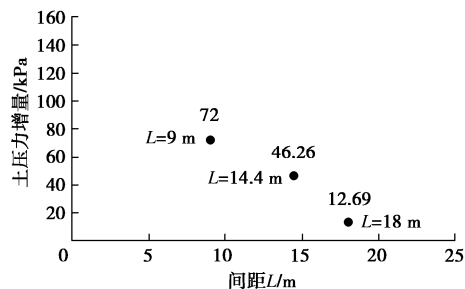
图 10 不同间距 L 土压力增量对比

Fig. 10 Comparison of increments of earth pressure under different spacings

3.4 归一化结果

不同筒靴间距情况下, 对桩靴贯入深度 5 m 时的桩靴下压阻力、筒壁应变 (A1)、筒顶位移 (H1)、土压力增量 (F3) 进行归一化处理。以筒靴间距 9 m 时的各项数值为 1, 得到各数据随筒靴间距的关系如图 11 所示。

如图 11 可知, 筒壁应变、筒顶位移和筒壁土压力增量结果均随筒靴间距的增加而减小。归一化的土压力增量和位移结果变化规律更接近线性, 根据趋势线可预测, 为减小桩靴插桩对钢圆筒的影响, 筒靴间距应超过 23 m, 即大于约 $1.3D$ 。

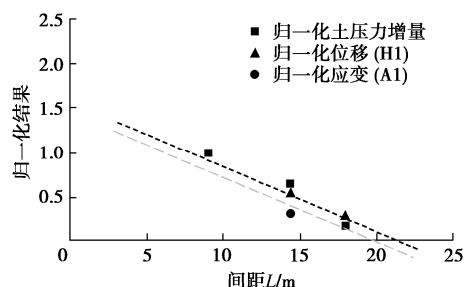


图 11 归一化试验结果-间距关系

Fig 11 Normalized result-spacing curves

4 结 论

采用土工离心机对黏土中桩靴插桩对邻近钢圆筒的影响进行研究, 分析了筒身应变, 筒顶位移和土压力的变化情况, 得到 5 点结论。

(1) 桩靴初始下压时, 钢圆筒受桩靴插桩的影响较小, 桩靴贯入深度超过 2 m, 钢圆筒上筒身应变, 筒顶位移, 筒壁土压力都随桩靴贯入深度的增大而增大。变化规律与桩靴下压过程中下压阻力的发展规律一致。

(2) 钢圆筒上筒身应变, 筒顶位移, 筒壁土压力都随筒靴间距的增大而减小。对于桩靴贯入深度 5 m 的情况, 当筒靴间距 9 m 时, 钢圆筒筒身应力超过屈服极限, 筒壁发生屈服。而筒靴间距超过 14.4 m 时, 筒壁未发生屈服。

(3) 桩靴插桩导致钢圆筒筒壁应变增大, 主要集中在筒壁正对桩靴面, 左右 90° 范围内, 应变对称性分布。筒壁远离桩靴一侧的应变则受影响较小。

(4) 桩靴插桩引起的筒顶变形主要为水平向筒内发展。钢圆筒竖向隆起或沉降的变形均较小。对于桩靴贯入深度 5 m 的情况, 当筒靴间距 9 m 时, 筒顶最大位移为 0.6 m, 而筒靴间距 14.4 m 时, 最大位移为 0.33 m。

(5) 桩靴插桩后, 筒壁土压力增量沿深度方向增加, 正对桩靴面的土压力大于同深度侧面 45° 位置的土压力, 插桩引起的土压力沿筒壁向两侧递减。当筒靴间距 9 m 时, 筒顶最大土压力增量 72 kPa, 为对应理论位置竖向应力的 5 倍。而筒靴间距 14.4 m 时, 最大土压力增量为 46 kPa, 为对应理论位置竖向应力的 3 倍。

综合本文研究, 黏土中桩靴插桩对邻近钢圆筒的影响较为明显, 不可忽视。对于实际工程应考虑采取增大间距, 减小桩靴尺寸, 减小桩靴贯入深度等适当安全措施。

参考文献:

- [1] 李 勇, 李艳莉, 刘学涛, 等. 浅水油气田开发水下干式采油装置[J]. 中国海洋平台, 2020, **35**(4): 95-100. (LI Yong, LI Yanli, LIU Xuetao, et al. Subsea dry production unit for shallow water oil field development[J]. China Offshore Platform, 2020, **35**(4): 95-100. (in Chinese))
- [2] 丁小彬, 施 钰, 陈俊生. 基于三维离散元的大直径钢圆筒下沉侧摩阻力[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, **48**(4): 15-27. (DING Xiaobin, SHI Yu, CHEN Junsheng. Side friction of large-diameter steel cylinder simulated using 3D discrete element method[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, **48**(4): 15-27. (in Chinese))
- [3] 国际临海开发研究センター. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan[M]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.
- [4] 插入式钢圆筒结构设计及施工规范: JTS 167-13—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Design and Construction Code of Embedded SteelPlate Cylinder Structure: JTS 167-13—2019[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))
- [5] SICILIANO R J, HAMILTON J M, MURFF J D, et al. Effect of jackup spudcans on piles[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, 1990.
- [6] CRAIG W H. Spud-can foundations: installation with deep penetration and subsequent removal[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 1998, **131**(3): 146-151.
- [7] XIE Y. Centrifuge Model Study on Spudcan-pile Interaction[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [8] ZHANG H, LIU R, YUAN Y. Influence of spudcan-pile interaction on laterally loaded piles[J]. Ocean Engineering, 2019, **184**: 32-39.
- [9] 陈洋彬, 郑敬宾, 王 栋. 弱超固结黏土中桩靴贯入形成孔洞对承载力影响[J]. 海洋工程, 2021, **39**(1): 112-120, 170. (CHEN Yangbin, ZHENG Jingbin, WANG Dong. Effect of cavity on the bearing capacity of spudcan foundation in lightly overconsolidated clay[J]. The Ocean Engineering, 2021, **39**(1): 112-120, 170. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)